

Caracterização acústica de grutas turísticas. Casos de estudo em Portugal



António P. O. Carvalho, Joana I. V. Sousa

Laboratório de Acústica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal
carvalho@fe.up.pt

PACS: 43.55.Gx

Resumen

Desde el Paleolítico, la Humanidad ha aprovechado las características acústicas de cuevas naturales para sus rituales. Hoy en día, muchas se utilizan turísticamente e incluso para eventos musicales. Este trabajo estudia tres cuevas turísticas de las montañas de Aire y Candeeiros (Portugal) en las que se hicieron mediciones in situ de los niveles de presión sonora de ruido ambiental, RASTI y tiempo de reverberación, obteniéndose valores promedio de TR 1,3 a 1,7 s y una alta inteligibilidad RASTI (0,50-0,57). También se mide el coeficiente de absorción acústica (en un tubo de ondas estacionarias) de la roca circundante de estas cuevas.

Resumo

Desde o Paleolítico, o Homem tem tirado proveito das características acústicas de grutas naturais para os seus rituais. Hoje, muitas são usadas turisticamente e até para eventos musicais. Este trabalho caracteriza três grutas turísticas das serras de Aire e Candeeiros (Portugal) onde foram feitas medições in situ dos níveis de pressão sonora do ruído ambiente, RASTI e Tempo de Reverberação, obtendo-se valores médios do TR de 1,3 a 1,7 s e de RASTI reveladores de uma elevada inteligibilidade (0,50 a 0,57). Mediu-se também o coeficiente de absorção sonora (em tubo de ondas estacionárias) da pedra envolvente dessas grutas.

Abstract

Since the Palaeolithic, mankind has been taking advantage of the acoustical characteristics of natural caves to perform its rituals. Nowadays many of these spaces are used as touristic attractions or even as stage of musical performances. This study characterizes three touristic caves in Portugal where in situ measurements were made of background noise sound pressure level, RASTI and Reverberation Time. The average RT values were 1.3 to 1.7 s and the RASTI average values revealed good intelligibility (from 0.50 to 0.57). The sound absorption coefficient of the stone that surrounds these caves was also measured in a standing wave apparatus.

1 Introdução

Desde Eras distantes, uma das características que terá levado o Homem a uma maior utilização e fruição de determinadas grutas seria a sua capacidade de potenciar ou reagir ao som interior, de acordo com o que seria pretendido. Hoje, várias grutas são espaço de visitas turísticas, celebrações ou locais de culto, concertos ou outros espectáculos, pelo que será interessante conhecer se estes espaços são de facto adequados às actividades para os quais são utilizados. [1-3]

2 As grutas em estudo

As grutas em estudo (Moeda, Santo António e Alva-dos) localizam-se nas serras de Aire e Candeeiros, no interior do Maciço Calcário Estremenho (reserva de calcário de grande extensão), na fronteira entre os distritos de Leiria e Santarém (Portugal). Todas são utilizadas como grutas turísticas, abertas a visitas de público geral, recebendo esporadicamente actuações musicais. Com uma grande permeabilidade à água, devida à presença de fendas relacionadas com fracturas e diáclases que

levam à infiltração rápida da água no solo em profundidade, os fenómenos de erosão cársica decorrentes da erosão do calcário são relevantes neste maciço, levando à escorrência da água nas superfícies, transportando e depositando partículas de calcite, e dando origem a superfícies complexas e compactas, com estalactites, estalagmites e outras formações. Os espaços estudados em cada uma das grutas corresponderam aos locais do seu maior volume livre, que já foram palco de actuações musicais ou de outras actividades.

As grutas da Moeda consistem em salas que se ligam entre si como se de um túnel se tratasse, sempre fortemente preenchidas com formações cársicas, sendo o seu espaço de maior volume a zona da *Cascata* e a *Sala do Pastor* (fig. 1).

As grutas de Santo António são constituídas por duas salas ligadas por um túnel natural. A sala estudada, a *Grande Sala*, é uma câmara de grandes dimensões com grande densidade de estalactites, estalagmites, colunas e cortinas (fig. 2).

As grutas de Alvados são constituídas por diversas salas interligadas por túneis naturais e artificiais, pelo que as formações naturais estão mais concentradas nos locais não alterados. As suas paredes são aproximadamente verticais, pelo que a acumulação de calcite se dá de forma dispersa, originando salas amplas e mais regulares do que nos restantes casos.

Apesar da semelhança de características geológicas, os três espaços estudados apresentam grandes diferenças a nível morfológico, tanto a nível da volumetria (quadro 1) como da forma e ocupação dos espaços. Esta última é muito distinta de gruta para gruta: nas grutas da Moeda existe uma formação clara em túnel; nas grutas de Santo António a *Grande Sala* é um espaço amplo e de grandes dimensões mas fortemente ocupado por for-

mações cársicas; nas grutas de Alvados, o espaço estudado é também amplo mas mais pequeno e livre de formações.

Sala estudada (Gruta)	Moeda	Santo António	Alvados
Área (m ²)	476	1382	198
Volume (m ³)	2930	8640	1350

Quadro 1. Valores aproximados da área e volume de cada um dos espaços estudados [4].

O comportamento das três grutas, como é comum em grutas com esta génese, sofre alterações sazonais: durante o Inverno e, em períodos de chuva frequente e intensa, ocorre a infiltração de água a partir da superfície de forma bastante abrangente e em elevada quantidade, sendo por isso uma fonte de ruído. Já durante o estio, estas infiltrações reduzem-se consideravelmente, reduzindo também o nível sonoro do ruído produzido pela água.

3 Tempo de reverberação

Os valores médios obtidos para o Tempo de Reverberação (*TR*) por banda de frequência, com medição em 5 ou 6 pontos distintos, são representados na figura 3 [4]. Nas grutas da Moeda obtém-se um *TR médio* [500,1k] de 1,3 s. Tendo em conta a rigidez e compacidade do material da envolvente e o volume da sala em estudo, estes valores são bastante baixos em relação ao espetável. Uma análise mais detalhada do espaço permite justificar estes valores: todas as superfícies são altamente rugosas e com relevos muito complexos e de várias dimensões, que difundem ou confinam as ondas sonoras até que estas percam uma energia de modo que sejam inaudíveis. Estas irregularidades são ainda responsáveis pela existência de uma grande área de superfície



Figuras 1 e 2. Sala do Pastor e Cascata (Grutas da Moeda) e Grande Sala (Grutas de Santo António).

envolvente, fazendo com que, apesar da baixa capacidade de absorção sonora do material, como será comprovado no ponto 6, esta ocorra com algum significado. A figura 3 permite ainda verificar que os valores médios do TR nas grutas da Moeda são mais elevados nas baixas frequências do que nas altas, já que os desníveis e espaços de pequena dimensão que absorvem a energia de ondas de médias e altas frequências não o fazem tão eficazmente para ondas de baixas frequências, que conseguem ser reflectidas para o espaço de medição. O volume de ar influencia também a redução do TR acima dos 1 kHz.

Nas grutas de Santo António obtém-se *TR médio* [500,1k] de 1,7 s, sendo o TR relativamente constante para cada banda de frequências (fig. 3). O seu valor médio é bastante baixo tendo em conta o valor do volume deste espaço. Na *Grande Sala*, com espaços bastantes amplos mas com numerosas protuberâncias e concavidades de dimensão variada e superfícies muito irregulares, o som sofre muita difusão e é dispersada muita da energia nas suas reflexões. O efeito da grande área da superfície envolvente faz-se sentir, já que origina uma absorção considerável que também diminui o TR. As altas frequências sofrem sempre mais alguma absorção do que as baixas, já que o ar absorve mais energia nas primeiras.

Os TR medidos nas grutas de Alvados conduzem ao *TR médio* [500,1k] de 1,5 s. As causas dos baixos valores do TR podem ser de novo atribuídas à grande dissipação e absorção de energia sonora nas superfícies irregulares e de grande área que constituem a envolvente do espaço, havendo neste caso também alguma influência das quatro passagens de acesso ao espaço que têm uma dimensão relevante, por onde tanto baixas como altas frequências penetram e acabam por perder energia sem que voltem ao espaço de análise. Analisando a figu-

ra 3 verifica-se que os valores do TR descem significativamente e quase continuamente dos 100 aos 5k Hz. A sala analisada trata-se de um espaço amplo, com uma forma aproximadamente regular e paralelepípedica. As suas superfícies são rugosas, mas com poucas deformações de grande dimensão. Assim, não existe muita dissipação da energia das ondas sonoras de baixas frequências, ao contrário do que acontece com as altas frequências.

Comparação de Resultados

O maior TR é registado nas grutas de Santo António, sendo estas as grutas em que o espaço estudado tinha o maior volume livre. Como neste caso o volume era quase o triplo do volume do espaço estudado nas grutas da Moeda, e mais do sêxtuplo do volume do espaço estudado nas grutas de Alvados, este efeito sobrepõe-se à complexidade do relevo das suas superfícies que não é suficiente para anular o efeito do volume acrescido.

A curva de ajuste aos resultados estabelece que apenas 47% da variação dos valores do TR é explicada pela variação do volume. A comparação das grutas da Moeda com as de Alvados comprova que o aumento de volume não implica necessariamente o aumento do TR, possivelmente devido às suas configurações com características antagónicas: o primeiro trata-se de um espaço intrincado, com superfícies envolventes muito irregulares, já o segundo local é um espaço amplo, sem grandes deformações e relativamente regular. Assim, as ondas sonoras perdem muito mais energia nas grutas da Moeda do que nas grutas de Alvados. Também a relação entre área superficial da envolvente e volume é maior nas primeiras do que nas segundas, existindo por isso maior absorção nas grutas da Moeda. Conclui-se então que a morfologia destes espaços tem uma importância crucial no seu comportamento acústico: quanto mais intrincada for a

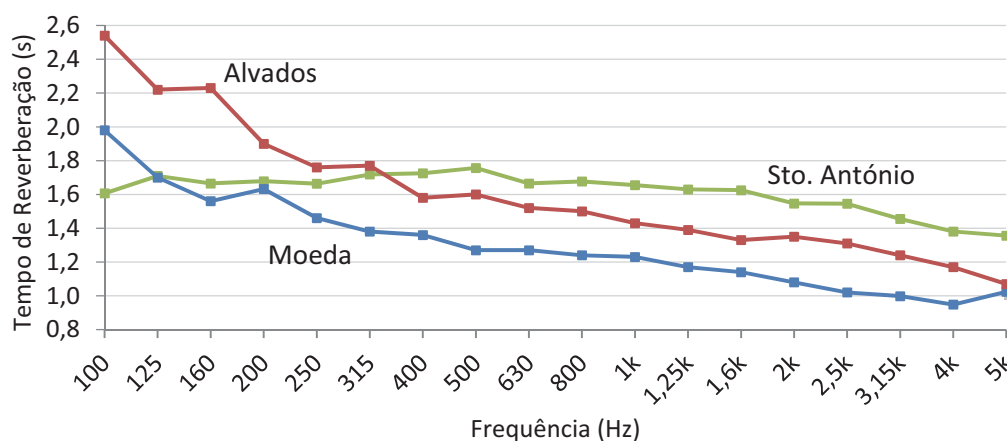


Figura 3. Valores médios do TR por banda de 1/3 de oitava nas três grutas.

morfologia do espaço e os relevos na sua superfície, menor será o TR, devido ao aumento da absorção sonora equivalente.

4. Ruído de fundo

Grutas da Moeda

As medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (L_{eq}) em período chuvoso foram feitas na *Sala do Pastor*, num ponto central onde a influência do som da água da cascata artificial a cair não se sobrepõe tanto ao restante ruído. Estas foram feitas em três momentos distintos: com a cascata artificial e a música de fundo ligadas (CM), apenas com a música de fundo (M) e sem nenhuma das fontes de ruído activada (SA), sempre sem visitantes. Importa referir que por a cascata ter sido ligada para a primeira medição houve um aumento da quantidade de água percorrendo a gruta e consequentemente do ruído remanescente após desligada. Aplicando o filtro A aos valores medidos obtém-se um LA_{eq} de 63 dB para a situação CM, 52 dB para a situação M e 40 dB para a situação SA (fig. 4).

As medições em período seco foram realizadas na sala *Marítima* devido à constante presença do ruído de água na zona que compreendia a *Sala do Pastor* e a *Cascata*. Esta medição conduziu aos valores indicados no quadro 2, que foram influenciados pelos cursos artificiais de água, já que estes foram desligados poucos minutos antes da medição. Ainda assim, verifica-se que o L_{Aeq} é notoriamente baixo (< 25 dB). Durante 10% do tempo de medição o nível sonoro encontrou-se abaixo dos 20 dB(A) e durante 50% do tempo esteve abaixo dos 21 dB(A). Com um L_{Aeq} em período chuvoso, sem equipamentos ligados, de 40 dB e em período seco de 23 dB pode-se concluir que a circulação de água tem grande influência na acústica deste espaço.

Grutas de Santo António

Nas grutas de Santo António optou-se pelo espaço mais amplo e como ponto de medição. O L_{eq} em período chuvoso foi medido quer durante um período de visitas (CV), quer durante um período sem visitas (SV). Os valo-

res registados e corrigidos com o filtro A conduziram a um L_{Aeq} de 54 dB para a situação CV e de 33 dB para a situação SV (fig. 4), sendo notório o acréscimo do L_{Aeq} provocado pelas visitas. Quando sem visitas, o valor bastante mais elevado do nível sonoro nas altas frequências deve-se principalmente ao efeito da queda das gotas de água.

Nas medições em período seco obtiveram-se resultados que demonstram o quão silenciosos são estes espaços (quadro 2), com um L_{Aeq} de 21,6 dB, um L_{A10} de 24 dB e um L_{A90} abaixo dos 20 dB, valores dificilmente atingidos fora de câmaras reverberantes ou anecóicas. Pode-se afirmar que este será dos espaços naturais mais silenciosos em Portugal, mesmo com a interferência de infiltrações permanentes, das correntes de ar e da possível presença de fauna.

Grutas de Alvados

Nas grutas de Alvados foi escolhido um ponto central ao espaço para a medição do ruído de fundo em período chuvoso, para reduzir a influência de gotejamentos próximos às paredes. Apenas se analisaram os ruídos naturais do espaço. Não foi possível fazer a medição do L_{Aeq} em período seco devido à maior afluência de visitantes. Também nesta gruta a fonte principal de ruído está na queda das gotas de água, já que não há qualquer outra interferência sonora. Obtém-se então um L_{Aeq} de 32 dB (fig. 4), que, embora denote algum ruído, é um valor baixo.

Comparação de Resultados

A comparação entre as três grutas no que toca ao ruído de fundo apenas incide sobre a situação de não estarem equipamentos ruidosos ligados e de não estarem a ocorrer visitas, em período chuvoso, já que foi a única situação que foi possível determinar em comum entre as três, bem como a situação de período seco. Os resultados obtidos apresentam-se na figura 4, para período chuvoso, e o resumo dos L_{Aeq} obtidos é apresentado no quadro 2 [4].

A figura 4 permite afirmar que as grutas da Moeda serão as mais ruidosas no período chuvoso. As infiltra-

Gruta	LA_{eq} (dB)		LA_{10} (dB)	LA_{50} (dB)	LA_{90} (dB)
	Seco	Chuvoso	Seco	Seco	Seco
Moeda	23,1	40,3	25,0	21,0	20,0
Santo António	21,6	32,7	24,0	20,5	<20,0
Alvados	—	32,4	—	—	—

Quadro 2. Valores do nível sonoro do ruído de fundo medidos em período *seco* (sem actividade ou equipamentos ligados) e em período *chuvoso* (ruído apenas resultante da infiltração de água, sem visitas ou equipamentos ligados), nas grutas da Moeda, de Santo António e de Alvados.

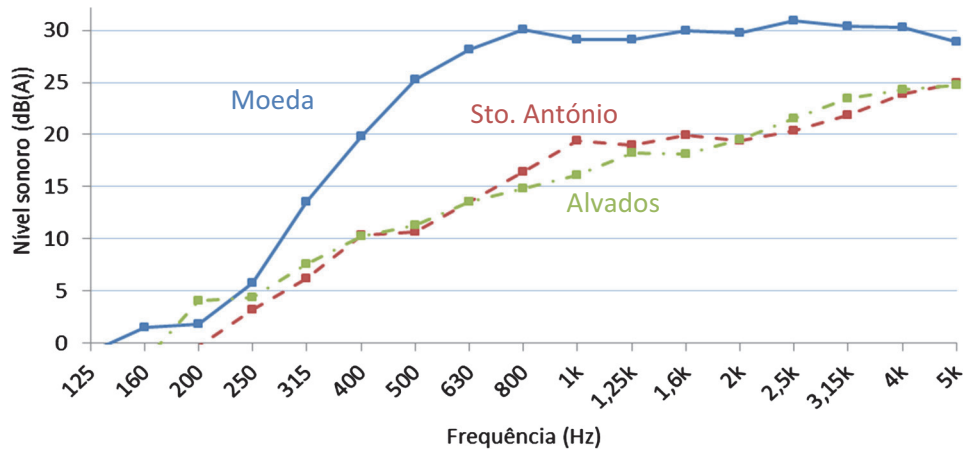


Figura 4. Níveis de pressão sonora filtrados com o filtro A por banda de frequência de terço de oitava em cada gruta para a situação de ruído apenas da infiltração de água, sem visitas ou equipamentos ligados.

ções e queda de gotas de água em período chuvoso são significativas, causando o aumento do nível sonoro nas altas frequências. Ainda assim, mesmo em período chuvoso, pode-se considerar que o ruído de fundo nestes espaços tem um valor bastante baixo, com um valor médio de L_{Aeq} de 34 dB. Comparando a situação de período chuvoso e de período seco pode-se concluir que a infiltração de água é a grande responsável pelo ruído no interior destes espaços, já que provoca um acréscimo de 12 dB(A) no nível sonoro médio detectado.

5 Rasti

A comparação dos valores do RASTI medidos em cada espaço (quadro 3) conduz à percepção de qual das grutas proporcionará uma melhor percepção da palavra, um factor de extrema importância na rentabilização destes espaços.

Gruta	Moeda	Santo António	Alvados
RASTI médio	0,54	0,50	0,57

Quadro 3. Valores do RASTI médio para cada uma das grutas estudadas.

Com um valor médio (nas três grutas) de 0,54 e valores mínimos próximos dos 0,40 pode-se afirmar que a percepção da palavra em todos os espaços estudados é bastante boa. Verifica-se que a maior variação ocorre nas grutas da Moeda, já que a sua complexa morfologia causa grandes perdas de inteligibilidade à medida que o receptor se afasta da fonte sonora. Justifica-se ainda que a menor variação tenha sido registada nas grutas de Alvados, já que este é o espaço onde existiam menos obstáculos entre o ponto de emissão do sinal RASTI e os diferentes pontos de recepção. O baixo TR nas três gru-

tas contribui para um aumento da perceptibilidade da palavra, já que não ocorre o empastelamento dos sons emitidos.

6 Coeficiente de absorção sonora e factor de forma

A determinação experimental do coeficiente de absorção sonora (α) das amostras de rochas recolhidas das paredes das grutas foi feita através do tubo de ondas estacionárias. Os valores assim obtidos para o α correspondem à situação de incidência normal à amostra. Neste estudo, a face exposta não é paralela à base de suporte (é arredondada), pelo que se afectaram os resultados dum factor multiplicativo de 0,9 [4]. Sabe-se ainda que o valor do α real dum material engloba a sua capacidade de absorção das ondas incidentes em todas as direcções mas, apesar das aproximações existentes, não existe um método preciso que permita converter os valores obtidos no tubo de ondas estacionárias (incidência normal) em valores para incidência difusa. Assim, não foi feita nenhuma conversão neste estudo. As amostras (I e II) foram recolhidas das grutas da Moeda. A I é constituída por calcário Jurássico, com algumas fendas, pouco poroso e a II é constituída por calcário biogénico, com origem na deposição de calcite e estrutura cristalina. Foram obtidos os resultados do quadro 4.

Os valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de absorção sonora dos materiais que constituem as paredes das grutas permitem fazer uma estimativa da área real da envolvente, que pode ser extrapolada para outras grutas com a mesma génese. Assim, definindo um factor de forma F_r que traduz a razão entre o valor estimado da área da superfície

envolvente S_{env} e a área da envolvente caso as superfícies fossem regulares (S_{reg}) e aplicando a fórmula de Sabine utilizando o coeficiente de absorção sonora obtido, α_{TOE} , tem-se (1), sendo m a absorção sonora do ar, no volume livre V , e A_p a absorção por pessoa presente do espaço. Após calcular de modo aproximado a área da envolvente da sala da gruta caso as superfícies fossem regulares (S_{reg}), obtém-se os valores médios do factor de forma (F_f) cf. quadro 5 (de 1). Assim, a área real da envolvente é cerca de 2,2 a 2,8 vezes superior a uma situação de paredes lisas devido à presença de formações geológicas.

Banda de frequência (Hz)	500	1000	2000	4000
α I corrigido	0,09	0,08	0,08	0,09
α II corrigido	0,07	0,08	0,08	0,09

Quadro 4. Coeficientes de absorção sonora obtidos pelo método do tubo de ondas estacionárias para as amostras I e II (valores corrigidos (x0,9) devido ao excesso de área face à secção transversal do tubo).

$$F_f = \frac{S_{env}}{S_{reg}} \Leftrightarrow F_f = \frac{\frac{0,16V}{TR} - mV - 3 \times A_p}{\alpha_{TOE} \times S_{reg}} \quad (1)$$

Gruta	S_{reg} (m ²)	S_{env} (m ²)	$F_f = (S_{env} / S_{reg})$
Moeda	1 650	4 620	2,8
Santo António	3 700	10 360	2,8
Alvados	850	1 870	2,2

Quadro 5. Valores da área estimada do espaço caso as superfícies fossem regulares (S_{reg}), da área superficial real da envolvente com as form. geológicas (S_{env}) e do factor de forma (F_f) para cada gruta.

7 Conclusões

As grutas da Moeda, de Santo António e de Alvados são representativas de muitas outras a nível mundial, de formação cársica, pelo que os resultados aqui obtidos podem ser tidos como referência para espaços de características semelhantes.

Os resultados obtidos nas medições *in situ*, com valores médios de TR (500/1k) de 1,3 a 1,7 s e 0,50 a 0,57 para o RASTI, indicam características acústicas surpreendentemente pouco reverberantes tendo em conta a dimensão e o material que constitui a envolvente destes espaços. Estas grutas são espaços com baixo TR e uma boa inteligibilidade da palavra devido à complexa estrutura e morfologia das suas superfícies que, para além de provocar a difusão e rápida dissipação da energia sonora, representa uma grande área de absorção sonora. Os valores do LA_{eq} do ruído de fundo obtidos para o período chuvoso (32 a 40 dB) indicam um ruído ambiente pouco ou nada incomodativo mas audível. Os resultados obtidos para o período seco, de 22 a 23 dB(A) (com $LA_{90} < 20$ dB) confirmam a hipótese de estes se tratarem de espaços muito silenciosos. Estes são espaços que podem facilmente ser adaptados e utilizados para outros fins para além das já realizadas visitas guiadas.

A comparação dos TR e RASTI com valores considerados ideais para determinadas utilizações permite estabelecer quais os usos adequados a cada espaço, como indicado no quadro 6.

Referências Bibliográficas

- [1] Reznikoff, I., *Prehistoric paintings, sounds and rocks, in Studien zur Musikarchäologie III: 2nd Symposium of the International Study Group on Music Archaeology, Monastery Michaelstein (Germany)*, 2000.
- [2] González, N.J., et al., *The Parpalló Cave: A singular archaeological acoustic site*. The Journal of the Acoustical Society of America, 123(5): p. 3608-3613, 2008.
- [3] Iannace, G. e A. Trematerra, *The acoustics of the caves*. Applied Acoustics, 86 p 42-46, 2014.
- [4] Sousa, J., *Caracterização Acústica de Grutas Turísticas - Estudo de Casos (As Grutas das serras de Aire e Candeeiros)*, Dissertação de Mestrado Int. Engenharia Civil, FEUP, 2014.

Tipo de utilização	Grutas da Moeda	Grutas de Sto. António	Grutas de Alvados
Auditório (palavra) ou teatro	Adequado	Não Recomendado	Adequado
Música de câmara ou ópera	Adequado	Excelente	Excelente
Canto gregoriano, coro ou órgão	Não Recomendado	Não Recomendado	Não Recomendado
Música sinfónica	Barroca	Adequado	Excelente
	Clássica	Excelente	Adequado
	Romântica	Não Recomendado	Adequado

Quadro 6. Adequabilidade dos espaços de acordo com a sua utilização.